

## Modelo de un sistema híbrido de generación distribuida para una nano-red de CC

Model of a hybrid distributed generation system for a DC nano-grid

Modelo de um sistema híbrido de geração distribuída para uma nano-rede DC

**Marcos Rodrigo Ibarra Caicedo**

marcos.ibarra.caicedo@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4658-0648>

Facultad de Ingenierías de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas-Ecuador

### RESUMEN

Una gran parte de la población mundial vive en zonas rurales geográficamente aisladas, remotas y escasamente pobladas. Las nano redes que emplean sistemas energéticos híbridos (HES) basados en la energía fotovoltaica (FV) y los parques eólicos se consideran una opción eficaz para electrificar zonas remotas y aisladas que están lejos de las redes convencionales. Esto es aplicable a zonas que reciben altos promedios de radiación solar y suficiente velocidad media velocidad del viento anualmente. En esta investigación, se modeló, simuló y optimizó una nano red de CC híbrida solar fotovoltaica y eólica, con almacenamiento de energía y un generador diésel de. Se realizó un estudio del emplazamiento y se obtuvieron datos sobre el recurso eólico y la radiación solar para calcular la carga. solar para la previsión de la carga y la modelización del sistema. Se utilizó el software HOMER para la modelización del sistema. sistema. La optimización del coste mínimo del sistema se llevó a cabo de la instalación, teniendo en cuenta los costes de los componentes del sistema, la radiación solar horaria y los parámetros de calificación como entradas en el programa de simulación. Se especificaron las variables de sensibilidad para examinar el efecto de sus incertidumbres en el rendimiento del sistema. El análisis económico y medioambiental indicó que es más aconsejable electrificar los asentamientos remotos utilizando una nano red de CC basada en sistemas híbridos con múltiples fuentes renovables, ya que tienen menores costes de funcionamiento y son más ambiental debido a la menor dependencia de las unidades generadoras de diésel. de las unidades de generación diesel.

**Palabras claves:** Generación de distribución, Sistemas de energía híbridos, Nano redes, Optimización, Solar-PV.

### ABSTRACT

A large part of the world's population lives in geographically isolated, remote and sparsely populated rural areas. Nanogrids using hybrid energy systems (HES) based on photovoltaics (PV) and wind farms are considered an effective option to electrify remote and isolated areas that are far from conventional grids. This is applicable to areas that receive high average solar radiation and sufficient average wind speed annually. In this research, a solar photovoltaic and wind hybrid DC nanogrid, with energy storage and a diesel generator, was modeled, simulated and optimized. A site survey was carried out and wind resource and solar radiation data were obtained to calculate the load. solar system for load forecasting and system modelling. HOMER software was used for system modeling. system. The optimization of the minimum cost of the system was carried out from the installation, taking into account the costs of the system components, the hourly solar radiation and the qualification parameters as inputs in the simulation program. Sensitivity variables were specified to examine the effect of their uncertainties on system performance. The economic and environmental analysis indicated that it is more advisable to electrify remote settlements using a DC nano-grid based on hybrid systems with multiple renewable sources, as they have lower running costs and are more environmentally friendly due to less reliance on electricity generating units. diesel. of diesel generation units.

**Keywords:** Distribution generation, Hybrid power systems, Nano grids, Optimization, Solar-PV.

### RESUMO

Uma grande parte da população mundial vive em áreas rurais geograficamente isoladas, remotas e escassamente povoadas. As nanoredes usando sistemas de energia híbrida (HES) baseados em energia fotovoltaica (PV) e parques eólicos são consideradas uma opção eficaz para eletrificar áreas remotas e isoladas que estão longe das redes convencionais. Isso é aplicável a áreas que recebem alta radiação solar média e velocidade média do vento suficiente anualmente. Nesta pesquisa, uma nanorede CC híbrida solar fotovoltaica e eólica, com armazenamento de energia e um gerador a diesel, foi modelada, simulada e otimizada. Foi realizado um levantamento do local e obtidos dados de recursos eólicos e de radiação solar para o cálculo da carga. sistema solar para previsão de carga e modelagem do sistema. O software HOMER foi usado para modelagem do sistema. sistema. A otimização do custo mínimo do sistema foi realizada a partir da instalação, levando em consideração os custos dos componentes do sistema, a radiação solar horária e os parâmetros de qualificação como entradas no programa de simulação. Variáveis de sensibilidade foram especificadas para examinar o efeito de suas incertezas no desempenho do sistema. A análise econômica e ambiental indicou que é mais aconselhável eletrificar os assentamentos remotos usando uma nano-rede DC baseada em sistemas híbridos com múltiplas fontes renováveis, pois têm custos de funcionamento mais baixos e são mais ecológicos devido à menor dependência de unidades geradoras de eletricidade. diesel. de unidades de geração a diesel.

**Palavras-chave:** Geração de distribuição, Sistemas híbridos de energia, Nano grids, Otimização, Solar-PV.

## I. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son la solución preferida a los combustibles fósiles y su despliegue en sistemas sin conexión a la red está creciendo de forma constante en tanto en los países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo. A través de nano-redes de corriente directa que emplean sistemas energéticos híbridos se consideran cada vez más como una opción viable para electrificar y escasamente pobladas. Son capaces de proporcionar un suministro eléctrico fiable y de mejor calidad a los hogares y a los pequeños usuarios comerciales, impulsando así las actividades comerciales en las zonas rurales (Rossi et al., 2020). Una nano-red es un pequeño sistema de energía que utiliza una combinación de fuentes de energía renovables y no renovables para suministrar energía a pequeñas cargas locales (a menudo menos de 20 kW) como se muestra en la Fig. 1. Una nano-red emplea varios convertidores electrónica de potencia (DC/AC o DC/DC) para interconectar los generadores y las cargas a la nano-red (Kalair et al., 2020)

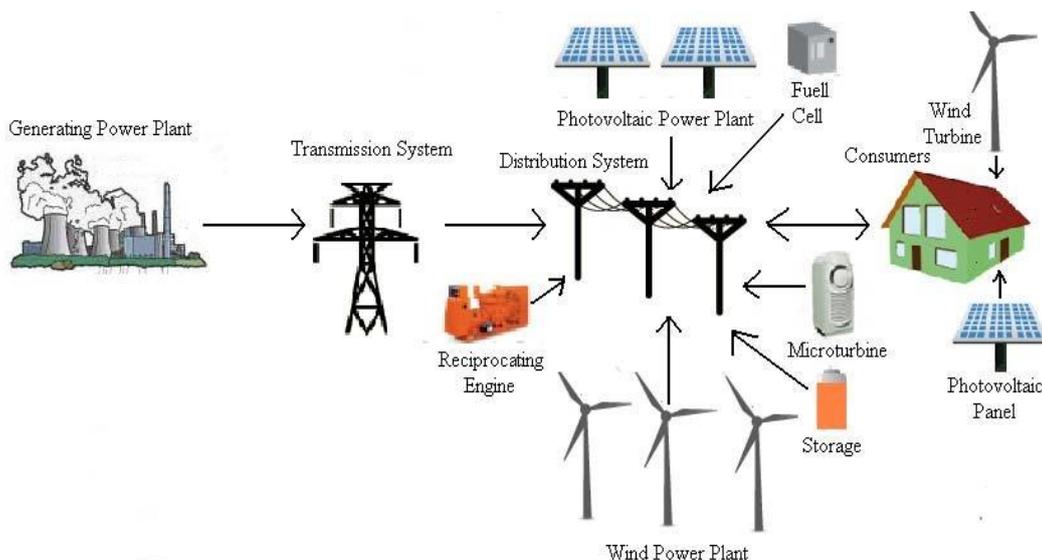


Figura 1. Diagrama esquemático de la nano-red.

Un sistema de generación de energía que combina dos o más fuentes de energía se denomina sistema híbrido. Los sistemas híbridos basados en fuentes de energía renovable, especialmente la fotovoltaica y la eólica son una opción eficaz para resolver el problema del suministro eléctrico en zonas remotas y aisladas, alejadas de la red eléctrica (Kumar et al., 2017).

Las variaciones estacionales de los recursos eólicos y solares pueden complementarse entre sí. Una explotación coherente de la complementariedad de estas dos fuentes de energía con el almacenamiento en baterías con generador diésel de apoyo parece necesaria para mantener un nivel óptimo de producción de electricidad en sitios adecuados. Las principales ventajas de estas tecnologías son su bajo coste de mantenimiento y sus bajas emisiones de contaminantes (Ding et al., 2019).

Ashok (Ashok, 2007) desarrolló un modelo de sistema energético híbrido para obtener una combinación óptima de energía para una comunidad rural típica minimizando el coste del ciclo de vida. El sistema híbrido microhidráulico/eólico resultó ser la configuración óptima para la electrificación de la aldea rural propuesta. Lal (K. Lal et al., 2011) propuso un sistema híbrido fotovoltaico/eólico y microhidráulico/diésel para una zona rural del distrito de Sundargarh. Los resultados de la simulación concluyeron que la disponibilidad de diferentes fuentes de energía renovable podría sustituir a las fuentes de energía convencionales como solución viable para la distribución de energía eléctrica para aplicaciones autónomas en lugares remotos y distantes, reduciendo así la dependencia de las unidades generadoras de diésel.

Khan (Schäfer et al., 2014) propuso el concepto de nano red de corriente continua destacando sus beneficios técnicos y algunos de los beneficios económicos y sociales como la solución más adecuada para las zonas rurales de Bangladesh para superar las limitaciones asociadas a los actuales sistemas solares domésticos. Concluyó que las nano-redes proporcionan servicios eléctricos altamente fiables y reducen el número de apagones. La mayoría de los electrodomésticos utilizan corriente continua.

El suministro de voltaje de corriente continua en lugar de corriente alterna a nivel doméstico significa que se utilizarán menos convertidores de energía, eliminando así el coste relativamente alto de los inversores y las pérdidas asociadas. El autor concluye que una nano red de corriente continua puede servir de soporte a actividades de desarrollo a pequeña escala, como la agricultura, lo cual es beneficioso en países predominantemente productores. Khan (Akpama & Uno, 2019) propuso un esquema de microcentral eléctrica híbrida basada en energía solar y eólica para una zona rural aislada y remota. El estudio concluyó que, mediante este tipo de microcentral híbrida, se pueden satisfacer las necesidades básicas de electricidad de una zona rural aislada de forma eficaz y efectiva.

En esta investigación, se modeló, simuló y optimizó una nano red de CC para una red híbrida solar eólica con almacenamiento de energía y un generador diésel de respaldo para la Parroquia rural Selva Alegre del cantón Eloy Alfaro en la Provincia de Esmeraldas Ecuador. El enfoque utilizado en este estudio puede aplicarse a asentamientos rurales similares. Se llevó a cabo un estudio del sitio y se obtuvieron datos sobre la radiación solar para establecer una estimación de la carga y un modelo del sistema. Se utilizó el software HOMER para diseñar y modelar los componentes del sistema propuesto. Se llevó a cabo una optimización del coste mínimo del sistema teniendo en cuenta los costes de los componentes del sistema, la radiación solar horaria, los datos del recurso eólico y los parámetros de calificación como entradas en el programa de simulación.

## II. Previsión y evaluación de la carga

### A. Previsión de la carga

Para obtener la información sobre la carga típica y la utilización de la energía para una región del país distante, se espera que se haga un cálculo de la carga para la zona de la provincia propuesta. En esta revisión, se eligió la Parroquia rural Selva Alegre del cantón Eloy Alfaro.

como análisis contextual. Se estima que la región tiene 70 casas y 10 tiendas. Se ayudó a la estimación de la carga mediante una visión general dirigida a través de reuniones y encuestas.

Para la elección del tamaño de la prueba se utilizó la regla de evaluación del tramo. El tamaño del ejemplo se determina utilizando la ecuación (1):

$$SS = \frac{z^2 * P(1-P)}{C^2} \quad (1)$$

Donde:

ss - Tamaño de la muestra;

z - Puntuación Z para el nivel de confianza seleccionado de la tabla de puntuación z;

P - Desviación estándar;

C - Intervalo de confianza elegido.

El nuevo tamaño de la muestra necesario se calcula utilizando la ecuación (2):

$$SS_{new} = \frac{ss}{1 + \frac{ss-1}{Pop}} \quad (2)$$

Donde:

$SS_{new}$  - Nuevo tamaño de la muestra;

$ss$  - Tamaño de la muestra calculado a partir de la ecuación (1);

$P_{op}$  - La población considerada en el estudio.

Se eligió un nivel de confianza del 98% con un intervalo del 8%. La desviación estándar (P) también se eligió para 0,8. A partir de la tabla de puntuaciones z, el valor de la puntuación z cercano a 0,98 (nivel de confianza del 98%) es 1,98. Por lo tanto, la carga de los hogares se calculó de la siguiente manera:

$$SS = \frac{1.98^2 * 0.8(1-0.8)}{\left(\frac{8}{100}\right)^2} = 98$$

$$SS_{new} = \frac{98}{1 + \frac{98}{70}} = 40.83$$

El tamaño de la muestra de carga comercial se calculó como sigue:

$$SS = \frac{1.98^2 * 0.8(1-0.8)}{\left(\frac{8}{100}\right)^2} = 98$$

$$SS_{new} = \frac{98}{1 + \frac{98}{10}} = 9$$

### **B. Evaluación de la carga**

Se seleccionaron todas las tiendas para la realización de la encuesta y, dado que el número total de casas es inferior a 100 (primera regla general en de la muestra), se consideraron todas las casas para una previsión de carga más precisa. La información obtenida de los propietarios de las tiendas y los residentes de los hogares fueron sus fuentes de energía actuales y los aparatos eléctricos que probablemente utilizarían si tuvieran acceso a la electricidad. La demanda total de carga y el consumo (energía) se calculan de la siguiente manera:

Carga total (W) =Potencia nominal (W) x Cantidad, y

Energía total (Wh) =Carga total (W) x Horas de uso

La carga media por vivienda y por tienda se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$Load\ house_{avr}(kW) = \frac{Demand_{Tot}(W)}{Houses_{Tot} \times 1000w/kw} \quad (3)$$

Donde:

$Demand_{Tot}$  - Demanda de carga total;

$Houses_{Tot}$  - Número total de casas

El consumo medio de electricidad (energía) por hogar y por tienda se calcula utilizando la ecuación siguiente:

$$Energy\ house_{avr}(kWh) = \frac{Energy_{Tot} (Wh)}{Houses_{Tot} \times 1000wh /kwh} \quad (4)$$

Donde:

Tot Energy - Consumo total de energía;

Tot Casas - Número total de casas

La Tabla I ilustra la demanda de carga estimada para el área de estudio. La demanda de carga máxima para los hogares y las tiendas es de 1,30 kW/día/hogar y 2,82 kW/día/tienda, respectivamente.

Tabla I. Demanda de carga estimada para la zona de estudio

Tipo de carga	Por unidad (kW)	Cantidad	Total de Carga (kW)
Hogar	1,30	70	91
Tiendas	2,42	10	24,2
Total			115,2

El Tabla II ilustra el consumo de energía estimado para el área de estudio. El consumo máximo de energía para los hogares y las tiendas es de 7,68kWh/día/hogar y 9,25kWh/día/tienda, respectivamente.

Tabla II. Consumo de energía estimado para la zona de estudio

Tipo de carga	Por unidad (kW)	Cantidad	Total de Consumo (kW)
Hogar	7,68	70	537,6
Tiendas	9,25	10	92,5
Total			630,1

### III. Implementación del sistema

#### A. Localización geográfica del lugar y base de datos climáticos

Las coordenadas de latitud y longitud de la zona de estudio son 0°55.3'N y 78°52.3'W respectivamente. Las coordenadas de latitud y longitud de la zona de estudio son necesarias para obtener los datos de insolación del lugar y la velocidad del viento del sitio web de energía solar de superficie de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) (Twaha et al., 2012). La radiación solar anual y la velocidad media anual del viento para la zona de estudio obtenidas de la NASA son 5,14 kWh/m<sup>2</sup>/d y 3,5 m/s respectivamente.

#### B. Aplicación del código HOMER

Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) es un software de optimización de micro energía desarrollado por Mistaya Engineering, Canadá, para el Laboratorio Nacional de Energía Renovable

(NREL) de EE. UU. (National Renewable Energy Laboratory, 2005). HOMER es un software de optimización para sistemas de energía híbridos conectados a la red y fuera de la red. La flexibilidad de HOMER lo hace útil para proyectos de electrificación rural a través de sus tres tareas principales: simulación, optimización y análisis de sensibilidad.

### 1) Análisis de energía

#### a) Perfil de carga

La Fig. 2 muestra el requerimiento diario de carga eléctrica por hora para las cargas domésticas y comerciales obtenidas a través de la encuesta. Hay una carga base de 0.55kW. Pequeñas cargas máximas de 0.50kW ocurren de 6 am a 8 am y 1.20kW y 0.95KW de 18 pm a 21 pm. La carga máxima diaria del área de estudio es de 115 kW con un consumo de energía promedio anual escalado de 630 kWh/día.

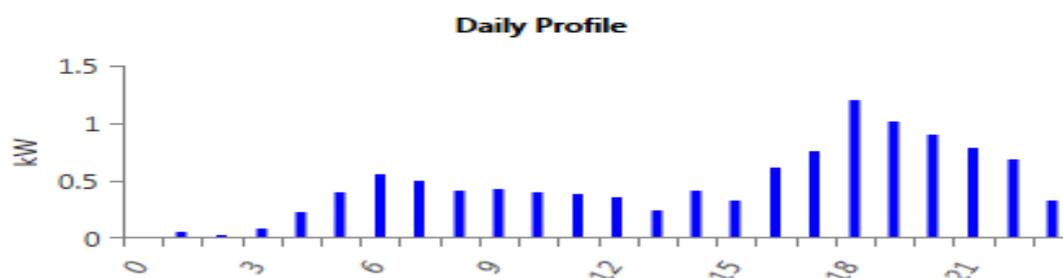


Figura 2. Perfil de carga diaria de la zona de estudio

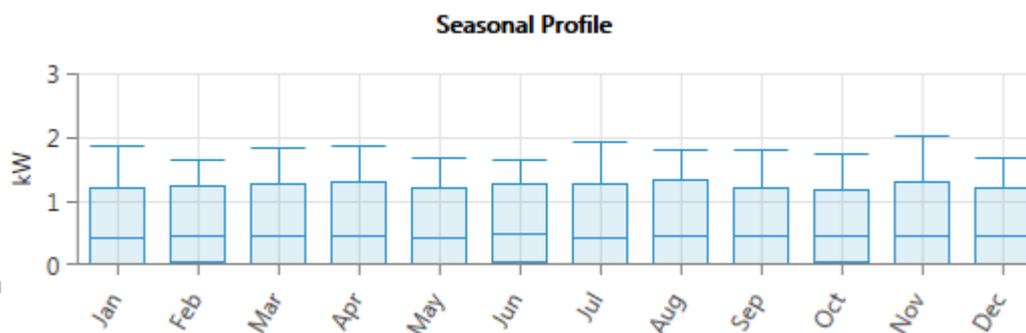


Figura 3. perfil de carga estacional de la zona de estudio.

#### b) Perfil de radiación solar

La Fig. 4 presenta el perfil del recurso solar para el área de estudio durante un período de un año. Se ha observado que la energía solar rangos de intensidad desde 3,960 kWh/m<sup>2</sup>/d a 4,35 kWh/m<sup>2</sup>/d. La radiación solar anual escalada es de 6,49 kWh/m<sup>2</sup>/d.

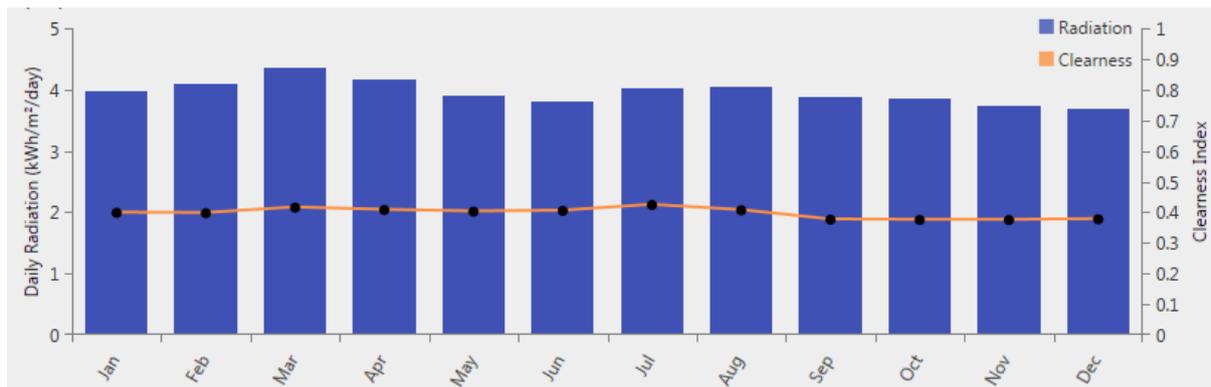


Figura 4. Radiación solar media mensual e índice de claridad.

### c) Datos del recurso eólico

La Fig. 5 podemos observar en el perfil del recurso eólico para el área de estudio durante un período de un año. La velocidad media anual del viento en 3,29 m/s.

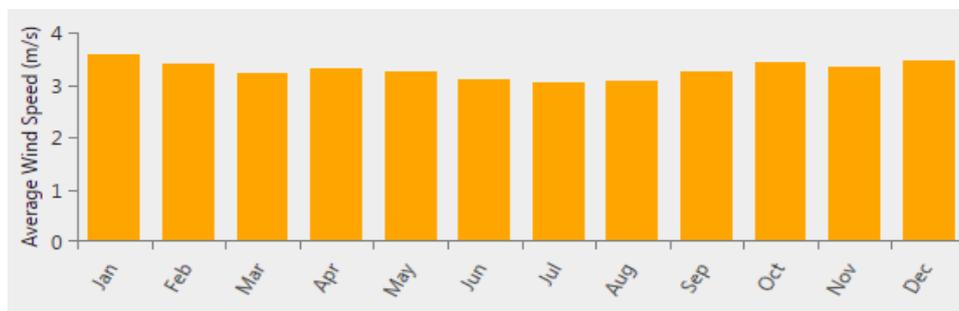


Figura 5. Velocidad media mensual del viento.

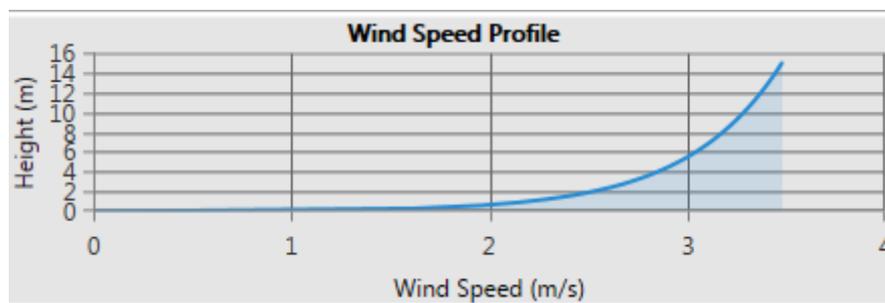


Figura 6. perfil de la velocidad del viento.

## 2) Análisis económico y restricciones confiables

En este estudio se consideró una tasa de interés anual del 10%, que es común en muchos países en desarrollo (Kassam, 2010); La vida útil del proyecto se tomó como 20 años. El análisis de sensibilidad evalúa el comportamiento del sistema cuando ciertos parámetros cambian sus valores. La Tabla III muestra las variables de sensibilidad consideradas en este estudio.

Tabla III. Variables de sensibilidad.

VARIABLES DE SENSIBILIDAD	VALORES
Precio del gasóleo (US\$/L)	1.29, 2.26, 3.40
máxima capacidad anual de suministro (%)	3, 4, 6
Velocidad media anual del viento (m/s)	3.50, 4.50, 5.50
Radiación solar media anual (kWh/m <sup>2</sup> /d)	5.13, 6.13, 7.13

### 3) Configuración del equipo del sistema

Los datos de entrada en el software HOMER incluyen: tamaños de los componentes bajo consideración, costo de adquisición, costo de reemplazo, costo de operación, costo de mantenimiento y vida útil esperada. La Tabla IV muestra los datos utilizados, que se obtuvieron de dos proveedores de equipos de energía solar en Sudáfrica, la empresa Solar-World y la tienda Green World. Solar-World es un fabricante líder mundial y cuenta con Alemania y Estados Unidos como su centro de excelencia para la tecnología solar, lo que garantiza una calidad de producto sostenible.

Tabla IV. Componentes del sistema.

Componente	Tamaño	Capital Costo (\$)	Reemplazamiento Costo (\$)	O&M costo (\$)	Toda la vida
<i>Generic flat plate PV</i>	0 - 100 kilovatios	3,000.00 por kW	3,000.00 por kW	10.00	20 años
<i>sonnenBatterie 7kW-10kWh eco 10</i>	215 ah a 3170 ah	290 por batería	260.69 por batería	2 por hora	20 años
<i>Generic 25kW Fixed Capacity Genset</i>	0 - 500 kilovatios	150,000.00 por kW	150,000.00 por kilovatios	5.000 por hora	50000 operando horas
<i>Bergey Excel 10-R</i>	35 a 75 kilovatios	10,000.00 por turbina	10,000.00 por turbina	50 por año	20 años

## IV. Rendimiento y tamaño del sistema

### a) Sistema FV

En las aplicaciones de energía solar fotovoltaica, la radiación solar se convierte directamente en electricidad, mediante el uso de células solares de silicio que están unidas eléctricamente en una placa base para formar una unidad generadora de energía llamada panel/arreglo solar. La potencia suministrada por el panel se calcula mediante la ecuación (5) (Faraji et al., 2020; Nwaigwe et al., 2019).

$$P_{PV\_out} = P_{N-PV} * \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) * [1 + K_T (T_C - T_{ref})] \quad (5)$$

Donde:

$P_{PV\_out}$ : La potencia de salida de la célula fotovoltaica;

$P_{N-PV}$ : La potencia nominal en condiciones de referencia;

G: La radiación solar ( $W / m^2$ );

$G_{ref}$ : Radiación solar en condiciones de referencia ( $G_{ref} = 1000W / m^2$ );

$T_{ref}$ : Temperatura de la célula en condiciones de referencia ( $T_{ref} = 25^\circ C$ ),

$K_T$ : Coeficiente de temperatura de la potencia máxima ( $K_T = -3.7 \times 10^{-3}$  ( $1 / ^\circ C$ )) para el Si monocristalino y policristalino. La temperatura de la célula  $T_C$  se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$T_C = T_{amp} + (0.0256 + G) \quad (6)$$

Donde:

$T_{amp}$ : La temperatura ambiente.

Como entrada al programa de simulación, el sistema fotovoltaico tiene que ser dimensionada con precisión. De acuerdo con las prácticas estándar, los paneles solares deben dimensionarse entre un 10 y un 30% por encima del tamaño de la carga para garantizar el suministro. (Madni et al., 2019; Zamrodah, 2016).

Para este estudio, el tamaño de los paneles solares es un 20% superior al de la carga. Se utilizó un factor de reducción de potencia del 80% y una vida útil de 20 años. Los paneles solares generan más energía cuando se colocan en un ángulo igual a la latitud de ese lugar (Madni et al., 2019; Zamrodah, 2016). En esta investigación se eligió un ángulo de inclinación de los paneles de  $10,09^\circ$ .

### *b) Almacenamiento en baterías*

Los acumuladores de ciclo profundo se utilizan para almacenar la energía generada por los paneles fotovoltaicos con fines de respaldo cuando la generación total del sistema es inferior a la demanda de carga. La capacidad de almacenamiento ( $C_{Wh}$ ) se calcula utilizando la ecuación siguiente (Ibrik, 2020; Maleki

Akbar, 2018):

$$C_{Wh} = (E_L \times A_D) \eta_{inv} \times \eta_b \times DOD \quad (7)$$

Donde:

$E_L$ : Demanda total de energía;

$A_D$ : Autonomía diaria;

DOD: Profundidad de descarga de la batería;

$\eta_{inv}$ : Eficiencia del inversor;

$\eta_b$ : Eficiencia de la batería.

El tipo de batería utilizado para el sistema propuesto es sonnenBatterie 7kW-10kWh eco 10 se caracterizan por ser libres de mantenimiento, tener una larga vida útil, un rendimiento de capacidad excelente incluso en condiciones extremas (temperatura de funcionamiento alta o redes eléctricas inestables) y una gran durabilidad con un uso cíclico, proporcionando así una extraordinaria solución eficiente y rentable (ILHA et al., 2021). Cada batería tiene una potencia de 240V, una capacidad nominal de 10kWh, capacidad nominal (Ah): 41.7, eficiencia de ida y vuelta (%): 86, corriente de descarga máxima (A): 28.

### *c) Dimensionamiento del sistema eólico*

El viento en los aerogeneradores pasa por la sección aerodinámica de las palas y la elevación producida genera un par que se transforma en electricidad dentro del generador. Se trata básicamente de la conversión de la energía eólica en energía mecánica de la turbina y finalmente se genera electricidad.

La energía horaria generada (EWEG) por un aerogenerador con potencia nominal (PWEG) se define mediante las siguiente formulas (Abdel-hamed et al., 2019; Mejbel Ali et al., 2018):

$$C_{Wh} = \frac{1}{2} \rho_{wind} A v^3 C_P(\lambda, \beta) \times \eta_t \times \eta_g \quad (8)$$

$$E_{WEG}(t) = P_{WEG} \times t \quad (9)$$

Donde;

$\rho_{wind}$ : Densidad del aire;

$A$ : Superficie de las palas;

$v$ : Velocidad del viento en m/s;

$C_P$ : Coeficiente de rendimiento de la turbina;

$\lambda$ : Relación entre la velocidad de punta de las palas del rotor y la velocidad del viento;

$\beta$ : Ángulo de paso de las palas (grados);

$\eta_t$ : Eficiencia del aerogenerador

$\eta_g$ : Eficiencia del generador.

En la simulación se utilizó un aerogenerador Bergey Excel 10-R DC con una vida útil proyectada de 20 años.

#### d) *Generador diesel*

Los generadores diésel actúan como fuente de alimentación de reserva en sistemas híbridos. En esta investigación, para el suministro de energía de reserva se utiliza el generador diésel en los momentos en los que la producción de los sistemas eólico y solar no es suficiente. cuando la producción de los sistemas eólico y solar no satisface la carga no y cuando el almacenamiento de la batería se agota. La energía horaria generada (E<sub>DEG</sub>) por un generador diésel con potencia nominal (P<sub>DEG</sub>) se define por la ecuación siguiente (Abdel-hamed et al., 2019; Mejbel Ali et al., 2018):

$$E_{DEG}(t) = P_{DEG}(t) \times \eta_{DEG} \quad (10)$$

Donde:

$\eta_{DEG}$ : Eficiencia del generador diésel.

El generador diésel, con el fin de obtener un mayor rendimiento y eficiencia, funcionará siempre entre el 85 y el 100% de su potencia nominal (Abdel-hamed et al., 2019). En esta investigación, se consideró un generador diesel Generic 500KW Fixed Capacity Genset. El precio del gasóleo tiene un impacto significativo en el coste de funcionamiento del generador diésel instalado (Kassam, 2010). El precio vigente del diesel es de 1,29 dólares por litro y se tomó como precio de referencia para el combustible diesel en esta investigación.

### V. Resultados y discusiones

#### A. *Modelo de una nano red basada en un sistema híbrido*

La Fig. 7 muestra el esquema del modelo híbrido fotovoltaico/eólico/diésel y sus componentes. Como se indica, el consumo de energía anual a escala es de 630.1kWh/día (Tabla II) y la potencia máxima es de 115.2kW/día (Tabla I). Los sistemas fotovoltaicos y eólicos son los principales sistemas de generación de electricidad. La electricidad de CC generada por estos sistemas de generación se alimenta a la barra de CC. El banco de baterías actúa como sistema de almacenamiento de energía para la nano red proyectada. La decisión de hacer funcionar el generador diesel se toma cuando la batería se descarga hasta su nivel mínimo y no haya suficiente energía generada por el sistema fotovoltaico y eólico para abastecer la carga. Este proceso de conmutación lo lleva a cabo el controlador de carga de la batería que en HOMER está incorporado en el bloque de la batería.

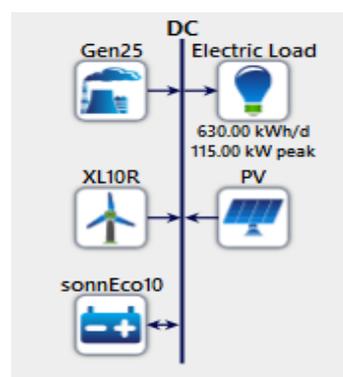


Figura 7. Esquema de la nano red basada en un sistema híbrido.

#### B. *Resultados de sensibilidad*

En esta investigación, la radiación solar media anual la velocidad media anual del viento, el precio del gasóleo y a la máxima capacidad anual de suministro (MACs) se tomaron como variables de sensibilidad para tener en cuenta el efecto de la variación de estas variables sobre el rendimiento y el coste del sistema. A partir de las simulaciones, se observa que el sistema híbrido solar/eólico/diésel es óptimo para el rango especificado de radiación solar, la velocidad del viento y el precio del gasóleo. Es decir, el sistema es menos

sensible a los cambios de estas tres variables porque las variaciones estacionales de los recursos eólico y solar son complementarias el uno del otro.

La tabla V muestra el resumen del rendimiento económico para diferentes MACs. El MAC se refiere al porcentaje de la carga total anual que se puede dejar sin servir para mejorar el rendimiento económico del sistema y se expresa en términos de porcentaje de la demanda actual (Barhoumi et al., 2021; Givler & Lilienthal, 2005). En esta investigación, se eligió para el análisis posterior la configuración óptima cuyo MAC es del 8%. Esto se debe a que se asocia con el menor Valor Actual Neto (VAN), bajo coste de operación y mantenimiento, y alta fracción renovable.

Tabla V. Resumen de los resultados económicos de diferentes MACS

MACS Valor	0%	3%	4%	6%
Valor actual neto (\$)	673961	629547	629547	549545
Valor de la energía (\$/kWh)	0.34	0.28	0.28	0.26
Coste de operación y mantenimiento (\$/año) O&M cost (\$/yr.)	50679	45347	45347	37745
Parte de la energía renovable (%)	69	67	67	74
Tiempo de funcionamiento del generador diésel (horas)	4934	5154	5154	6572
Consumo de combustible (L)	36357	31652	31652	25342

### C. Resultados de la optimización

El software HOMER realiza una simulación de todas las configuraciones de sistemas combinados en el espacio de búsqueda y clasifica las viables en función del valor actual neto (VAN). Es decir, se ordenan descendente desde la más rentable hasta la menos rentable, como se muestra en la Figura 8. El sistema óptimo se compone de un panel solar de 455KW, un generador diesel de 25.0 kW, 69 turbinas eólicas y 12 baterías. El valor actual neto (VAN) del sistema es de del sistema es de 381,529 dólares y el valor de la energía (COE) es de 0,161 \$/kWh.

Architecture								Cost				System	
PV (kW)	XL10R	Gen25 (kW)	sonnEco10	Efficiency1	Dispatch	NPC (US\$)	COE (US\$)	Operating cost (US\$/yr)	Initial capital (US\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)		
455	69	25.0	12	0	LF	US\$381,529	US\$0.161	US\$29,003	US\$71,925	88.5	8,479		
519	24		31	0	CC	US\$478,822	US\$0.201	US\$41,351	US\$37,404	100	0		
	174	25.0	8	0	CC	US\$525,778	US\$0.222	US\$37,731	US\$123,010	74.3	17,543		
839		25.0	23	0	LF	US\$558,658	US\$0.234	US\$48,332	US\$42,725	81.5	13,886		
440			42	0	CC	US\$607,520	US\$0.255	US\$54,809	US\$22,452	100	0		
	146		63	0	CC	US\$1.04M	US\$0.443	US\$87,673	US\$105,110	100	0		

Figura 8. Resultados optimizados por categorías

### D. Análisis de la producción de electricidad

La Figura. 9 se muestra la aportación de la producción de energía eléctrica por parte de varias fuentes en el sistema híbrido. El conjunto fotovoltaico tiene 61,5%, los aerogeneradores tienen 36,4% y el generador diésel generaron 2,1% de la energía total, respectivamente. La Parte de la energía renovable del sistema es del 97,9%.

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
Generic flat plate PV	727,370	61.5	AC Primary Load	0	0	Excess Electricity	955,447	80.7
Generic 25kW Fixed Capacity Genset	25,635	2.17	DC Primary Load	222,363	100	Unmet Electric Load	7,587	3.30
Bergey Excel 10-R	430,646	36.4	Deferrable Load	0	0	Capacity Shortage	11,722	5.10
<b>Total</b>	<b>1,183,651</b>	<b>100</b>	<b>Total</b>	<b>222,363</b>	<b>100</b>			

Quantity	Value	Units
Renewable Fraction	88.5	%

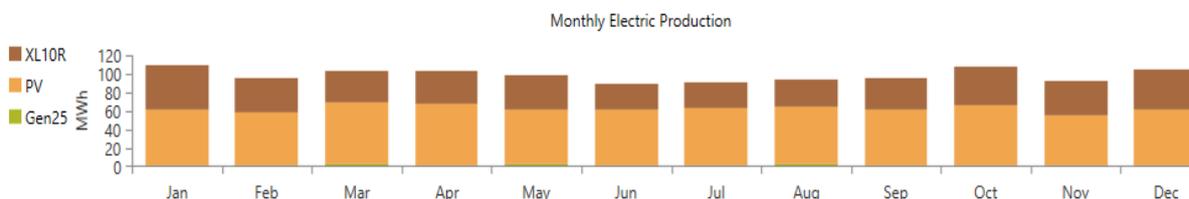


Figura 9. Contribución de la producción de energía eléctrica por varias fuentes en el sistema híbrido.

### E. Comparación económica del sistema híbrido FV/eólica/diesel y FV/diesel y fotovoltaico/diesel

En la figura 10 se presenta la comparación económica de los dos sistemas realizada a partir del resumen de flujo de liquidez obtenido del software de simulación HOMER. El sistema híbrido FV/diesel se ha tomado como caso base y ha sido comparado con el sistema actual, que es el sistema híbrido fotovoltaico/eólico/diesel. A partir de los resultados de la simulación, se ha demostrado que, aunque el coste de capital del sistema actual es elevado en comparación con el caso base, tiene un valor de costo neto actual (VAN), de operación y de mantenimiento mínimo. Mientras que en el caso base, el coste de capital inicial es bajo, pero los costes de explotación y mantenimiento son muy elevados. Esto significa que el sistema actual es más rentable a largo plazo en comparación con el caso base.

Architecture							Cost			System	
PV (kW)	XL10R	Gen25 (kW)	sonnEco10	Efficiency1	Dispatch	NPC (US\$)	COE (US\$)	Operating cost (US\$/yr)	Initial capital (US\$)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (L/yr)
455	69	25.0	12	0	LF	US\$381,529	US\$0.161	US\$29,003	US\$71,925	88.5	8,479
519	24		31	0	CC	US\$478,822	US\$0.201	US\$41,351	US\$37,404	100	0
174		25.0	8	0	CC	US\$525,778	US\$0.222	US\$37,731	US\$123,010	74.3	17,543
839		25.0	23	0	LF	US\$538,658	US\$0.234	US\$48,332	US\$42,725	81.5	13,886
440			42	0	CC	US\$607,520	US\$0.255	US\$54,809	US\$22,452	100	0
146			63	0	CC	US\$1.04M	US\$0.443	US\$87,673	US\$105,110	100	0

You may choose a different base case using the Compare Economics button on the Results Summary Table.

Architecture							Cost		
PV (kW)	XL10R	Gen25 (kW)	sonnEco10	Efficiency1	Dispatch	NPC (US\$)	COE (US\$)	Operating cost (US\$/yr)	Initial capital (US\$)
440			42	0		US\$607,520	US\$0.255	US\$54,809	US\$22,452
455	69	25.0	12	0		US\$381,529	US\$0.161	US\$29,003	US\$71,925

Metric	Value
Present worth (US\$)	US\$225,992
Annual worth (US\$/yr)	US\$21,171
Return on investment (%)	52.7
Internal rate of return (%)	21.8
Simple payback (yr)	9.25
Discounted payback (yr)	9.42

Figura 10. Comparación económica del sistema base y del sistema actual.

### F. Análisis medioambiental

Al generar la cantidad de GHG (en kg/año) emitida por el sistema modelado, el software de simulación HOMER permite realizar un análisis del impacto medioambiental. En esta investigación, se comparó la cantidad de GHG emitida por el sistema híbrido fotovoltaico/eólico/diesel para identificar el sistema más respetuoso con el medio ambiente. La Tabla VI indica claramente que el sistema híbrido solar/eólico/diesel reduce significativamente la cantidad de emisiones de GHG. Esto se debe a la menor dependencia de las unidades generadoras de diésel.

Tabla VI. Emisiones anuales de gases de efecto invernadero.

Cantidad	Valor	Unidad
Dióxido de carbono	22,197	kg/año
Monóxido de carbono	139	kg/año
Hidrocarburos no quemados	6,11	kg/año
Partículas	0,831	kg/año
Dióxido de azufre	54,4	kg/año
Óxido de nitrógeno	130	kg/año

## VI. CONCLUSIÓN

En este documento se ha modelado, simulado y optimizado una nano red de CC para un sistema híbrido solar-eólico con almacenamiento de energía y un generador diésel de reserva para un asentamiento rural local, cantón Eloy Alfaro en la Provincia de Esmeraldas Ecuador. Se realizó una investigación sobre el terreno y se obtuvieron datos sobre el recurso eólico y la radiación solar para la previsión de la carga y la elaboración del modelo del sistema. Se utilizó el software HOMER para diseñar y modelar los componentes del sistema propuesto. Se llevó a cabo una optimización del costo mínimo del sistema teniendo en cuenta los costos de los componentes del sistema, la radiación solar horaria y los parámetros de calificación como entradas en el programa de simulación. A partir de los resultados de la simulación, se ha obtenido un sistema óptimo compuesto por un conjunto fotovoltaico de 455kW, 16 aerogeneradores de 10 kW, un generador diésel de 25 kW y 12 baterías sonnenBatterie 7kW-10kWh eco 10. El valor Actual Neto (VAN), el Costo de la Energía y el periodo de recuperación del sistema obtenido han sido de 381.529 dólares, 0,161 dólares/kWh y 5 años respectivamente. es evidente que el sistema propuesto proporcionará energía fiable a un precio mucho más barato. Comparando los resultados, el sistema híbrido fotovoltaico/eólico/diésel con un 97.9% de integración de las energías renovables es rentable a largo plazo y evitaría o eliminaría la emisión de 35 toneladas de gases de efecto invernadero en comparación con el sistema híbrido fotovoltaico/diésel.

## REFERENCIAS

- Abdel-hamed, A. M., Ellissy, K., Adly, A. R., & Abdelfattah, H. (2019). Optimal Sizing and Design of Isolated Micro-Grid systems. *International Journal of Environmental Science & Sustainable Development*, 4(3), 1. <https://doi.org/10.21625/essd.v4i3.673>
- Akpama, E. J., & Uno, G. U. (2019). HOMER Analysis of the Feasibility of Solar Power for GSM Base Transceiver Stations Located in Rural Areas. In *European Journal of Engineering Research and Science* (Vol. 4, Issue 7, pp. 42–45). <https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.7.1339>
- Ashok, S. (2007). Optimised model for community-based hybrid energy system. In *Renewable Energy* (Vol. 32, Issue 7, pp. 1155–1164). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.008>
- Barhoumi, E. M., Farhani, S., Okonkwo, P. C., Zghaibeh, M., & Bacha, F. (2021). Techno-economic sizing of renewable energy power system case study Dhofar Region-Oman. *International Journal of Green Energy*, 18(8), 856–865. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1881899>
- Ding, Y., Wang, Z., Liu, S., & Wang, X. (2019). Energy Management Strategy of PV Grid-Connected Household Nano-Grid System. In *IEEE Power and Energy Society General Meeting* (Vols. 2019-Augus, pp. 3–7). <https://doi.org/10.1109/PESGM40551.2019.8973404>
- Faraji, J., Hashemi-Dezaki, H., & Ketabi, A. (2020). Multi-year load growth-based optimal planning of grid-connected microgrid considering long-term load demand forecasting: A case study of Tehran, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 1–51. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100827>

- Givler, T., & Lilienthal, P. (2005). Using HOMER® Software , NREL’s Micropower Optimization Model, to Explore the Role of Gen-sets in Small Solar Power Systems Case Study: Sri Lanka. *Contract, May*, 1–31.
- Ibrik, I. H. (2020). Techno-economic feasibility of energy supply of water pumping in palestine by photovoltaic-systems, diesel generators and electric grid. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(3), 69–75. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8816>
- ILHA, L. M., CIPRIANI, Jo. P. S., DAROS, G. C., OLIVEIRA, L. DE, SEIDEL, Á. R., ROGGIA, L., MORAIS, A. P. DE, & ROCHA, L. F. DA. (2021). *Projeto e Desenvolvimento de um Descarregador de Baterias Chumbo-Ácido com Aquisição de Dados*. <https://doi.org/10.53316/sepoc2021.067>
- K. Lal, D., B. Dash, B., & K. Akella, A. (2011). Optimization of PV / Wind / Micro-Hydro / Diesel Hybrid Power System in HOMER for the Study Area. In *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* (Vol. 3, Issue 3, pp. 307–325).
- Kalair, A. R., Abas, N., Hasan, Q. U., Seyedmahmoudian, M., & Khan, N. (2020). Demand side management in hybrid rooftop photovoltaic integrated smart nano grid. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 258). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120747>
- Kassam, A. (2010). HOMER Software: Training Guide for Renewable Energy Base Station Design | Mobile for Development. *Homer Manual*, 21.
- Kumar, N., Vasilakos, A. V., & Rodrigues, J. J. P. C. (2017). A multi-tenant cloud-based DC nano grid for self-sustained smart buildings in smart cities. In *IEEE Communications Magazine* (Vol. 55, Issue 3, pp. 14–21). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600228CM>
- Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Maleki Akbar. (2018). Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(2), 140–147. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cty006>
- Mejbel Ali, A., Saadoon Algburi, S., & Abdelmajed Aljaradin, r. M. (2018). Design Optimization of a Hybrid Hydro-Wind Micropower System for Rural Communities. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 22(02), 1–10. <https://doi.org/10.31272/jeasd.2018.2.62>
- National Renewable Energy Laboratory. (2005). Getting Started Guide for HOMER Version 2.1. In *Renewable Energy* (Issue April, pp. 1–30).
- Nwaigwe, K. N., Mutabilwa, P., & Dintwa, E. (2019). An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 629–633. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.07.002>
- Rossi, F., Parisi, M. L., Maranghi, S., Basosi, R., & Sinicropi, A. (2020). Environmental analysis of a nano-grid: A Life Cycle Assessment. In *Science of the Total Environment* (Vol. 700, Issue October 2019, p. 134814). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134814>
- Schäfer, M., Kammen, D., Kebir, N., & Philipp, D. (2014). Innovating Energy Access for Remote Areas: Discovering Untapped Resources. In *Proceedings of the International Conference*.
- Twaha, S., Idris, M. H., Anwari, M., & Khairuddin, A. (2012). Applying grid-connected photovoltaic system as alternative source of electricity to supplement hydro power instead of using diesel in Uganda. In *Energy* (Vol. 37, Issue 1, pp. 185–194). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.051>
- Zamrodah, Y. (2016). *Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation* (Vol. 15, Issue 2).